

Von Zielen und Grenzen der Informatik

Vollmar, Roland

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 51, 2001, S.9-24



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Von Zielen und Grenzen der Informatik¹

von **Roland Vollmar**, Karlsruhe*

(Eingegangen 14.05.2001)

Zusammenfassung

Erfolge verbinden und sind identitätsstiftend. Am Beispiel der Computerentwicklung wird skizziert, welchen Weg die Informatik zurückgelegt hat. Dass ihr eine (immer wachsende) Zahl von Fragen zu beantworten bleibt, dabei solch grundlegende wie die Unterscheidung von „Information“ und „Wissen“, wird an Beispielen erläutert. Zu ihrer Lösung ist eine entsprechende Ausbildung erforderlich, die neben (theoretischen) Erkenntnissen vor allem Methoden beinhalten sollte, um zum Verständnis zu führen.

Die Grenzen der Informatik zu kennen, von den „harten“ der Beschränktheit des algorithmisch Ausführbaren bis zu den ethisch bedingten, gehört dazu.

Im Verhältnis zu anderen Wissenschaften und Fächern sollten sie allerdings im Sinne der (englischen) *frontiers* verstanden werden und – unter Bewahrung der jeweiligen Eigenheiten – als Herausforderung zur Überwindung gesehen werden.

Mein Bild der Informatik

Entgegen guter akademischer Tradition beginne ich nicht mit einer Definition von „Informatik“, sondern versuche, sie umkreisend zu erfassen. Der Grund ist einfach: Auch unter „Eingeweihten“ gibt es unterschiedliche Meinungen über Zielsetzungen und Abgrenzungen.

Während bei den Grenzen fachwissenschaftliche Ergebnisse aufgeführt werden, wird Entsprechendes bei den Zielen nicht der Fall sein: Zu vermessen schiene es mir, detaillierte Forderungen zu stellen, zumal der drängenden Fragen zu viele sind.

Konzediert man, daß für Ethnien Katastrophen oder glorreiche Siege (oder weniger martialisch ausgedrückt, Erfolge) identitätsstiftend sind, liegt es nahe, auch eine (sich entwickelnde) Wissenschaft unter diesem Aspekt zu betrachten. Nachdem sich die oft beschworene „Jahr 2000“ – Katastrophe nicht ereignete, müssen wir wohl die Erfolge ins Auge fassen:

Die Informatik spielt eine so bedeutende Rolle in so vielen Anwendungsgebieten, daß die Absolventinnen und Absolventen über einen breiten Bereich von Firmen, Verwaltungen und Forschungsinstituten verteilt sind, eine Tatsache, die es ihnen auch in wirtschaftlich weniger guten Zeiten leicht machte, einen Arbeitsplatz zu finden und die derzeit zu

* Prof. Dr.-Ing. Roland Vollmar · Wendtstraße 10 · D-76185 Karlsruhe

¹ Der vorliegende Aufsatz beruht auf dem Manuskript eines Vortrags zur 10-Jahres-Feier der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld.

einer besonders starken Nachfrage führt. Diese breite Streuung und das Fehlen sehr großer bzw. sichtbarer „reiner Informatik-Unternehmen“ in Deutschland verhinderte bisher die Herausarbeitung bzw. die öffentliche Kenntnisnahme eines klaren, einfachen Bildes.

Der obige Hinweis auf die Anwendungsgebiete könnte fälschlicherweise den Eindruck aufkommen lassen, daß dieses Durchdringen der Produktion, der Organisation und auch des täglichen Lebens lediglich die elektronische Datenverarbeitung betreffe. Lassen Sie mich deshalb einige eher handgreifliche Erfolge der Informatik aufzählen und durch das Skizzieren (nur) eines mir wichtig erscheinenden Gebiete *mein Bild* der Informatik entwerfen:

„Altmodischerweise“ will ich mit Computern beginnen.

Die Steigerung ihrer Geschwindigkeit und die Erhöhung ihrer Speicherkapazität bei gleichzeitiger enormer Preisreduktion bedeuten einen ungeheuren Erfolg. Dadurch wurde es u.a. möglich, erschwingliche Autos mit ABS und Airbags auszustatten und z.B. hochwertige, bequeme Hörgeräte zu bauen. Diese Beispiele sind völlig zufällig, sind doch Computer ubiquitär geworden und an Stellen und in Geräten zu finden, in denen man sie kaum vermuten würde.

Aber auch die Programmierung oder besser gesagt, die Software-Erstellung braucht sich nicht zu verstecken: Programme, die global arbeitende Buchungssysteme ermöglichen, die zuverlässige Kommunikation über das Internet gewährleisten, und z.B. solche, die den weitgehend ortsunabhängigen Einsatz von Mobiltelefonen erlauben, sind hierbei zu nennen. Daß die Geschwindigkeit und die Perfektion solcher Systeme noch nicht immer beherrscht werden, sei beleuchtet durch den Hinweis auf das Aussetzen des Handels an der New Yorker Börse vor einigen Jahren. Die Verwendung von Programmen zum Entwurf von Häusern und Maschinen, einschl. Computern selbst, zur Auffindung von Lagerstätten, zur Wettervorhersage und Klimamodellierung, in der Astronomie, zum Einsparen teurer Experimente, z.B. in Crashtests, zur „Konstruktion“ von Molekülen wird bereits als selbstverständlich betrachtet. Daß all dies nicht der Informatik allein gutzuschreiben ist, versteht sich von selbst.

All diesen Entwicklungen liegen aber Ergebnisse aus den folgenden Bereichen zugrunde, die mit zur neuen Methodologie der Informatik beitragen:

- *Algorithmisierung*: Das Auffinden und Erfinden von Algorithmen ist nicht nur die Grundlage zur Lösung von Problemen sondern verhilft zum tieferen Verständnis der verschiedensten Phänomene, Probleme und Prozesse.
- *Formalisierung*: Formale Beschreibungen und Symbolmanipulierungssysteme haben insbesondere für die Spezifikation realer Systeme und ihre Verhaltensweisen eine besondere Bedeutung gewonnen.
- *Komplexitätsuntersuchungen*: Die Einsicht, daß formale Objekte und Prozesse eine inhärente Komplexität besitzen, zu deren Messung unterschiedliche Ressourcenmaße herangezogen werden können, trägt wesentlich zu ihrem Verständnis bei und hat weitreichende Auswirkungen bez. ihrer Anwendbarkeit.

- *Untersuchung komplexer Systeme*: Während lange Zeit in den Naturwissenschaften Fortschritte dadurch erzielt wurden, daß Grundphänomene isoliert untersucht wurden, erlauben Informatikmethoden das Herangehen an interagierende, stark miteinander verkoppelte Systeme.

Wesentliche Fortschritte werden dabei erzielt durch

- Simulation und
- Visualisierung.

In Parenthese sei hier bemerkt, daß die Informatik es ja auch ganz wesentlich mit höchst komplexen, nämlich chaotischen Systemen zu tun hat. Wie Hartmanis [11] sagt, ist die die Berechnungen ausführende Hardware universell und chaotisch: Die kleinsten Veränderungen der Befehle oder der Daten können beliebig große Differenzen der Resultate nach sich ziehen.

Wie Antoniou et al. [1] betonen, ist ja der Begriff des komplexen Systems nicht neu, konnte aber erst mit Informatik-Methoden „in Angriff genommen“ werden:

„Some of the central characteristics of complexity, including instability and chaos, were known to both Maxwell and Poincaré. But they lacked the mathematical tools to make any progress with these topics. Only with advances in IT was it possible to develop the new mathematics that the science of complexity requires.“

Abstrahierungen von realen Systemen erlauben eine Modellbildung, die sich in Programme übersetzen läßt und durch deren (wiederholte und parametrisierte) Ausführung Rückschlüsse auf die realen Systeme gezogen werden können und diesen innewohnende Gesetze aufgedeckt werden können. (Noch) nicht existierende Systeme können untersucht werden, wobei sogar die physikalischen und/ oder biologischen Gesetzmäßigkeiten modifiziert werden können. Beschleunigung oder Verlangsamung von Vorgängen ist ebenso möglich wie z.B. deren Umkehrung.

Ergebnisse solcher Simulationen sind, wie auch die von umfangreichen Berechnungen, z.B. der Wettervorhersage, oder der statistischen Analyse sehr großer Datenmengen (z.B. beim sog. data mining) nur dann nutzbar, wenn sie in einer dem Menschen entsprechenden Form vorliegen. Dies gewährleisten Werkzeuge zur Visualisierung bzw. im dynamischen Fall, z.B. bei Crashtests, der Animation.

Informatik als neue Methodologie

Hiermit ist nur ein kleiner Teil von dem angesprochen, was das informatische Vorgehen zu einer neuen Methodologie werden ließ. In den Natur- und Ingenieurwissenschaften bildet es, nicht nur nach Auffassung eines Gremiums, das als Schweizer Pendant zu unserem Wissenschaftsrat angesehen werden kann (und nach Hartmanis und Lin [12]), neben theoretischem und experimentellem Vorgehen die dritte Säule der wissenschaftlichen Arbeitsweise. Die Informatik erweitert die durch Theorie und Experiment gebotenen Möglichkeiten beträchtlich, insbesondere in den bisher nicht zugänglichen Bereichen komplexer Systeme, wofür hier nur Telekommunikationsnetze und Klimamodelle als Beispiele angeführt seien. Komplexe Vorgänge werden verstehbarer, es können Voraussagen über

ihr (künftiges) Verhalten gemacht werden, die auch dazu benutzt werden können, entsprechende physikalische, chemische, biologische und technische Prozesse zu optimieren; in den Worten des Rubbia-Reports:

"Bringing closely together simulation (a simplified abstraction of reality) and modelling (a conceptual artificial representation of the real world) it offers the triple power of explanation, prediction and optimisation."

Gehen wir jetzt etwas näher auf die drei genannten Begriffe „explanation, prediction, optimisation“ ein und versuchen dabei, uns klar zu werden, warum die Gesellschaft (mehr oder weniger willig) bereit ist, Geld für die Wissenschaft auszugeben – und nicht z.B. nur für Autobahnen und Freizeitparks. Lassen wir dabei einmal u.a. die medizinische Wissenschaft außer Betracht und konzentrieren uns auf die Natur- und Ingenieurwissenschaften, wobei jetzt ohne weitere (eigentlich notwendige) Diskussion Informatik und auch Mathematik subsumiert seien.

Bis zum Ende des Kalten Krieges wurden diese Wissenschaften gefördert (nicht nur, aber entscheidend), um die Verteidigungsfähigkeit zu erhalten und auszubauen. Inzwischen hat sich die Priorität eher auf den „nationalen Wohlstand“ verschoben, worunter eine Verbesserung der Lebensverhältnisse in einem weiten Sinne zu verstehen ist, nicht nur den Konsum betreffend sondern auch z.B. den Umweltschutz.

Da wir davon abgekommen sind, uns „die Erde untertan“ zu machen und begriffen haben, daß menschliches und menschenwürdiges Leben nur im Einklang mit ihr auf die Dauer wird möglich sein, gewinnt auch die Erkenntnis Raum, daß dabei eine Vielzahl von Interdependenzen zu beachten sind. Zur Beantwortung der sich dabei aufdrängenden Fragen der Optimierung wird die Informatik entscheidend auch methodologisch beitragen (müssen).

Sie wird dabei „im Großen“ (zumindest in manchen Anwendungen) von der algorithmischen Sichtweise und Strenge abgehen und sich mit suboptimalen Ergebnissen oder solchen, die nur mit hoher Wahrscheinlichkeit das Optimum darstellen, die aber mit erträglichem Zeitaufwand erhalten werden können, begnügen.

Soft Computing“ (ich kenne leider keinen adäquaten deutschen Ausdruck dafür) ist die Bezeichnung für diesen Zweig der Informatik: „The term soft computing was coined by Lofti A. Zadeh to describe a collection of methodologies that aim to exploit the tolerance for imprecision and uncertainty to achieve tractability, robustness and low solution cost [...]“ (Azvine et al. [2]). Insbesondere auch hinsichtlich einer stärkeren Einbeziehung biologischer Prinzipien ist ein solcher Ansatz attraktiv (von der Malsburg [27]).

Daß den Natur- und Ingenieurwissenschaften zugetraut wird, Vorhersagen zu machen, ja daß dies bei oberflächlicher Betrachtung als ihr Charakteristikum angesehen wird, braucht wohl nicht ausführlich erläutert zu werden. So selbstverständlich ist es uns, daß z.B. die Astronomie Methoden entwickelt hat, eine Sonnenfinsternis vorherzusagen bzw. voraus zu berechnen und daß z.B. eine Brücke nicht erst gebaut werden muß, um festzustellen, daß sie bestimmte Lasten tragen kann.

Hingewiesen sei auf die Unterschiedlichkeit dieser beiden Beispiele: Während bei dem ersten ein natürliches System analysiert und dann modelliert wird, steht beim zweiten die Modellierung eines zu bauenden Systems, das gewisse Eigenschaften aufweisen soll, im Vordergrund. Natke [19] spricht zur Klarstellung der Unterschiede von direkten Modellen

und inversen Modellen. In der Informatik wird man es, ebenso wie in den (übrigen) Ingenieurwissenschaften, hauptsächlich mit Aufgaben letzterer Art zu tun haben. Insofern ist es auch naheliegend, deren Konstruktionsprinzipien, vor allem Modularisierung und Hierarchisierung, zu adaptieren.

Vom „Verstehen“ in der Informatik

S. Toulmin hat in einem Büchlein mit dem Titel „Voraussicht und Verstehen“ [24] m.E. sehr schön dargelegt, daß wir mit den (richtigen) Voraussagen allein nicht zufrieden sind bzw. sein sollten, sondern daß wir (zusätzlich) Verständnis gewinnen wollen. Ich denke, ein überzeugendes Beispiel ist das der Pharmakologie. Ist man zunächst vielleicht froh, ein Medikament gegen ein bestimmtes Leiden entdeckt zu haben, wird man doch nicht ruhen, bis man zumindest im Grundsatz die Wirkungsmechanismen aufgeklärt hat.

Wir wollen etwas näher auf das „Verstehen“ in der Informatik zu sprechen kommen; dem seien Bemerkungen über die Wichtigkeit des Begriffes „Information“ vorangestellt (Ausführlicher wird zu dem Folgenden in Gruska et al. [10] eingegangen): Bis zu Beginn des Industriezeitalters wurde der Fortschritt daran gemessen, wie die Menschen fähig waren, das Potential der Natur zu nutzen, um genügend Nahrung in geeigneter Form zu erlangen.

In der industriellen Ära kam es für die Menschen darauf an, das Potential und die Gesetze der Natur so zu nutzen, daß Energie in entsprechender Weise verfügbar war.

Im Informationszeitalter, in das wohl zumindest die „erste Welt“ bereits eingetreten ist, werden Fortschritte in dem Maße erreicht, in dem die Menschen lernen, Zugang zu Informationen in genügender Menge und in wünschenswerter Form zu haben.

Aus dieser Sicht muß der Informatik die Bedeutung für diese „Informationswelt“ zugestanden werden, die die Physik für die physikalische, durch Energie charakterisierte Welt hat.

Nachdem ich oben auf einige Erfolge der Informatik eingegangen war, will ich in diesem Zusammenhang jetzt einige Fragen vorlegen, auf die vollständige Antworten noch ausstehen:

- Was ist Information?
Was ist Wissen?
Wie können sie gemessen werden?
- Welche Elemente, Strukturen und Prozesse bilden die Informationswelt?
Durch welche Gesetze und welche Begrenzungen ist sie geprägt?
- Welche Probleme können mit Informatikmethoden in Angriff genommen werden?
- Welche Rolle spielen Ressourcen wie Zeit, Speicher, Parallelität, Nichtdeterminismus, Zufälligkeit, Interaktion bei der Problemlösung?
- Welche Fähigkeiten besitzen existierende und denkbare informationsverarbeitende Maschinen?
- Wie können formale Beschreibungsverfahren effizient genutzt werden?

- Was sind komplexe Systeme?
Wie können sie spezifiziert, entworfen, konstruiert und verifiziert werden?
- Wie sind Informatikmodelle zu erstellen?
Wie können sie zum Verständnis der physikalischen, der biologischen, der sozialen Welt genutzt werden ?

Bereits zur Klärung der im ersten Punkt genannten Fragen, die Unterschiede zwischen „Information“ und „Wissen“ betreffend, wären umfangreiche Abhandlungen nötig. Hier sei nur darauf verwiesen, daß – wie in Hellige [13] schön dargestellt – schon die frühen Enzyklopädien ausgefeilter Organisationsstrukturen bedurften, um sie handhabbar zu machen, und es sei ein Zitat von Mittelstraß [17] angeführt:

"Unübersehbar beginnt unter dem Signum einer Informationsgesellschaft eine rationale Kultur ihre Orientierungs- und Wissensformen zu verändern, nämlich eine Situation ins Auge zu fassen, in der der Begriff der Information an die Stelle älterer Wissens- und Orientierungsbegriffe tritt. [...]"

Daß wir uns in einer Informationswelt einzurichten beginnen, in der sich die Informations-, Kommunikations- und Produktionsstrukturen schneller ändern als je zuvor, und daß unsere Gesellschaft im Begriff der Informationsgesellschaft ein neues Selbstverständnis gewinnt, bedeutet nicht, daß eine derartige neue Welt und eine derartige neue Gesellschaft ohne Probleme wären. Tatsächlich löst die Informationswelt nicht nur Probleme, sie schafft auch (neue) Probleme. Zu diesen gehört, daß Information zwar auf Wissen beruht, daß sie sich immer konsequenter aber auch an die Stelle des Wissens setzt. Die Folge ist, daß wir immer weniger durchschauen, was uns in Form von Informationen zur Verfügung steht. Während man sich Wissen strenggenommen nur als Wissender aneignen kann, Wissen den Wissenden voraussetzt, setzt Information im wesentlichen Verarbeitungskapazität und Vertrauen voraus. Informationen muß man vertrauen, wenn man ihr Wissen, das über die Information transportierte Wissen, nicht prüfen kann. Dies bedeutet aber, daß im Medium der Information Wissen und Meinung ununterscheidbar werden; der 'Informierte' weiß in der Regel nicht, ob er in einer Wissenswelt oder in einer Meinungswelt lebt. [...]"

Hier kommt es darauf an, sich klarzumachen, daß Information nicht eigentlich eine Wissensform, sondern eine Kommunikationsform ist. In Informationsform machen sich Wissen und Meinungen transportabel. Das heißt aber auch, noch einmal, daß diese sich in Informationsform einander angleichen, schwer voneinander unterscheidbar werden. Informationen sieht man in der Regel nicht an, ob sich hinter ihnen Wissen oder Meinungen verbergen. Und eben darin liegt das Problem mit einem Informationsbegriff, von dem manche schon meinen, daß er einen neuen Wissensbegriff darstelle. [...]"

Während Wissen damit, wie Kompetenz, Gegensatz von Dummheit ist, gilt dies von Information nicht grundsätzlich und nicht in allen Fällen. Gemeint ist, daß der sachverständige Umgang mit Wissen eigene Wissensbildungskapazitäten und eigene begründungsnahe Beurteilungskapazitäten voraussetzt, der Umgang mit Information in der Regel nicht."

Die Frage, ob damit die Ausbildung von Informatikern „einfacher“ sein kann als die in anderen Wissenschaften, wäre natürlich nur polemisch, sie leitet aber zu einer kurzen Diskussion über das Informatikstudium über.

Es kann bei unserem Thema nicht völlig unbeachtet bleiben, denn woher sollen denn die Wissenschaftler kommen, die die Informatik voranbringen? Natürlich soll durch das Studium nicht nur auf den Beruf des Wissenschaftlers vorbereitet werden. Ist also die in vielen Prüfungsordnungen zu findende Forderung, daß Absolventen in der Lage sein sollen, Probleme mit aktuellen wissenschaftlichen Methoden zu lösen insofern zu anspruchsvoll, als sie nur von einem Teil von ihnen im Beruf benötigt werden wird?

M.E. führt diese Frage zu dem wesentlichen Schwachpunkt der immer einmal wieder aufflammenden Diskussion über die Anzahl der benötigten IT-Fachleute: Es wird allzu oft nicht unterschieden zwischen Personen, die in der Lage sein sollen, z.B. eine Homepage für die Web-Präsentation einer Firma zu entwerfen und solchen, die z.B. befähigt sind, ein komplexes System, wie es das Internet darstellt, soweit zu verstehen, daß sie es – sagen wir es mal sehr pauschal – „verbessern“ können.

Was ist zu letzterem nötig?

Meiner Überzeugung nach – schlagwortartig – ein Verständnis dessen, was die Informatik ausmacht. Dies ist leicht gesagt, aber nicht so einfach umzusetzen, weil sich dahinter unterschiedliche Auffassungen verbergen können.

Schauen wir uns einmal eine Erklärung aus dem „Etymologischen Wörterbuch“ [14] an. Dort heißt es u.a. „‘Er versteht seine Sache’ ist ursprünglich Rechtsausdruck ‘er vertritt sie (vor dem Thing) in überlegener Weise, bis er obsiegt’. Die Vorsilbe (s. ver-) steht im Sinn des lat. per- in perstare. Von der geistigen Beherrschung einer (Rechts-) Sache geht die Entwicklung zum richtigen Erfassen eines geistigen Zusammenhangs...“.

Für die Informatik könnte man dies vielleicht dahingehend paraphrasieren, daß über das Beherrschen von Ergebnissen und Methoden hinaus, was wir mit Handhabungs- oder Anwendungswissen bezeichnen wollen, eine Einsicht in Zusammenhänge und Grenzen anzustreben ist.

Notwendig scheint mir dies insbesondere in der Informatik – wegen ihrer Jugend und damit ihrer nicht allzu großen Fülle von Ergebnissen (verglichen z.B. mit der Mathematik), aber auch ihres hohen Anspruches als Querschnittswissenschaft wegen. Für sie gilt in besonderem Maße was Mittelstraß [16] sehr schön mit folgenden Worten beschreibt:

„Hier war und ist es allemal so, daß mit jedem gelösten wissenschaftlichen Problem neue Probleme entstehen, mit jeder beantworteten Frage neue Fragen, mit jeder gewonnenen Einsicht neue Unwissenheiten. Im Anschluß an ein schon bei Pascal [...] auftretendes Bild formuliert: Das (wissenschaftliche) Wissen ist eine Kugel, die im All des Nichtwissens schwimmt und beständig größer wird. Mit ihrem Wachsen vergrößert sich ihre Oberfläche und mit dieser vermehren sich auch ihre Berührungspunkte mit dem Nichtwissen.“

Richtiger als die von Bodenheimer [4] als Buchtitel verwandte Aussage „Verstehen heißt antworten“ halte ich den Satz „Verstehen heißt fragen können.“ Wie schwierig es ist, im Anschluß an einen Vortrag über ein komplexes Gebiet oder auch an einen nur ungeschickt dargebotenen mehr als Höflichkeitsfragen zu stellen, ist uns wohl allen klar. Erinnern darf ich auch, wie es ist, einem nichttrivialen längeren Beweis zu folgen: Wenn man auch noch Schritt für Schritt „versteht“, hat man am Ende doch oft das Gefühl, „das Wesentliche“ nicht begriffen zu haben, also eine Einsicht in den Gesamtzusammenhang

nicht erhalten zu haben. Ähnlich geht es, wenn man zu nah vor dem Werk eines Pointillisten steht: Man sieht Farbpunkte – aber kein Bild.

Während sich letzteres leicht durch Zurücktreten erhalten läßt, gibt es zum Verstehen von Beweisen keinen Königsweg.

Über Einsicht, ein anderer Begriff für Verständnis, zu verfügen, setzt Kenntnisse voraus – und je weniger die den „Zufälligkeiten technischer Entwicklungen“ (F.L.Bauer) unterworfen sind, desto haltbarer und länger nutzbar sind sie zweifellos. Deshalb plädiere ich für das Vermitteln theoretischer Ergebnisse. Allerdings sollten die sich nicht auf solche aus der sog. „theoretischen Informatik“ – nebenbei gesagt, ein Rudiment einer m.E. völlig überholten Strukturierung des Faches – beschränken, sondern Prinzipien und Methoden der Analyse und der Konstruktion komplexer Systeme, seien sie natürlich, technisch oder gedanklich gegeben, ebenso umfassen wie die äußerst wichtige Algorithmmik.

Damit Sie einen sinnlichen Eindruck von dem bekommen, was ich meine, will ich einige Beispiele anführen, wozu ich allerdings etwas ausholen muß.

Algorithmen werden in der Mathematik seit über zweitausend Jahren verwandt, ohne daß allerdings bis zu Beginn des 20. Jhs. dieser Begriff näher diskutiert wurde. Ab Mitte der dreißiger Jahre wurden einige Vorschläge zur formalen Fassung von „Algorithmus“ gemacht, die sich letztlich als äquivalent (im mathematischen Sinne) erwiesen und die mittlerweile weitestgehend als adäquat akzeptiert sind. Der lange Zeit dominierende war der der sog. Turingmaschine [23]. Sie besteht aus einem potentiell unendlichen Band aus einzelnen Feldern, in denen jeweils ein Symbol aus einem (endlichen) Bandalphabet stehen kann und einer Lese-Schreib-Einheit, die sich in einem von endlich vielen Zuständen befindet und auf jeweils genau ein Feld weist (dieses „liest“). In einem „Schritt“ „überschreibt“ diese Einheit das gerade gelesene Symbol, bewegt sich auf dem Band in Abhängigkeit vom Zustand und gelesenen Symbol nach rechts oder links bzw. bleibt auf diesem Feld und ändert den Zustand gemäß einer vorgegebenen Überföhrungsfunktion.

Man spricht dann von einer *deterministischen* Turingmaschine, während eine *nichtdeterministische* Turingmaschine mittels einer Überföhrungsrelation beschrieben wird.

Eine Berechnung z.B. einer einstelligen Funktion startet – grob gesprochen – mit der (codierten) Eingabe des Variablenwertes auf dem Band; nach endlich vielen Schritten steht der Funktionswert (codiert) auf dem Band.

Hervorgehoben sei, daß dann ein Algorithmus durch die (endliche) Überföhrungsfunktion bzw. -relation repräsentiert wird.

Gibt es einen Algorithmus für eine Funktion – den zu finden beliebig schwierig sein kann –, dann nennt man die betreffende Funktion berechenbar. Die Begriffsbildung läßt sich naheliegenderweise auf Probleme, bei denen nur „ja“ oder „nein“ als Antwort in Frage kommen (z.B., ob ein Bild symmetrisch aufgebaut ist), übertragen. Gibt es für eine solche Aufgabenstellung einen Algorithmus, dann spricht man von einem entscheidbaren Problem.

Nach der Formalisierung des Algorithmusbegriffes ist es möglich zu zeigen, daß es Funktionen und Probleme gibt, die nicht algorithmisch lösbar sind. Man spricht dann von nicht-berechenbaren Funktionen bzw. nichtentscheidbaren Problemen.

Die erwähnte Akzeptanz der Modelle spiegelt sich auch in der Church-Turing-These wider: Jedes im intuitiven Sinne lösbare (formale) Problem ist auch von einer Turingmaschine berechenbar und umgekehrt.

Grenzen innerhalb der Informatik m

Die Church-Turing-These, die die Möglichkeiten des algorithmisch „Machbaren“ beschreibt, sollte ebenso wie das Wissen um die Existenz algorithmisch unlösbarer Probleme zum Bildungskanon aller Wissenschaftler gehören, die mit Computern Umgang pflegen. Informatiker sollten darüber hinaus nicht nur um das Vorhandensein dieser Grenze wissen, sondern sich auch näher mit deren Verlauf auseinandersetzen.

Ich denke dabei einmal an „minimale“ universelle Maschinenmodelle, wie z.B. daß zwei Zustände bzw. (allerdings nicht gleichzeitig) zwei Bandsymbole bei 1-Band-Turingmaschinen ausreichen – letzteres auch als „Hinweis“, daß die binäre Welt der Computer wirklich keine echte Einengung bedeutet oder daß für sog. Registermaschinen zwei Register genügen, aber auch an die Trennlinien – die keineswegs schon alle bekannt sind – zwischen entscheidbaren und unentscheidbaren Fällen von Problemen. Beispielfhaft seien hier (Gruska [8] zitierend) genannt:

- Bei Turingmaschinen (mit einem Band) ist das Halteproblem¹ entscheidbar, wenn das Produkt der Anzahl der Zustände und der Bandsymbole ≤ 6 ist und unentscheidbar, wenn es ≥ 24 ist.
- Das Äquivalenzproblem² ist für Registermaschinen mit Programmen der Länge ≤ 7 entscheidbar, mit solchen einer Länge ≥ 8 unentscheidbar.
- Das Postsche Korrespondenzproblem³ mit Listen über einem zweielementigen Alphabet ist entscheidbar, wenn die Anzahl der Wörter in den Listen ≤ 2 ist und unentscheidbar, wenn sie ≥ 7 ist.

Das letztgenannte Beispiel führt uns nahtlos über zu Komplexitätsbetrachtungen und damit in das Gebiet des Handhabbaren oder effizient Machbaren: Es ist unmittelbar zu sehen, daß eine vorgegebene Längenbeschränkung der Indexfolge ein beliebiges Postsches Korrespondenzproblem entscheidbar werden läßt. Können wir damit sicher sein, eine

¹ Ist eine Turingmaschine (in Form ihrer Überföhrungsfunktion) mit einer Anfangsbelegung des Bandes gegeben, dann bezeichnet man als Halteproblem die Frage, ob die Turingmaschine nach endlich vielen Schritten „zum Stillstand“ kommt.

² Unter dem Äquivalenzproblem (sowohl für Turingmaschinen und Registermaschinen als auch für Computerprogramme) versteht man die Aufgabe festzustellen, ob zwei entsprechende „Systeme“ das gleiche leisten.

³ Gegeben seien zwei endliche Listen von gleich vielen Wörtern über einer endlichen Menge von Symbolen. Die an „korrespondierenden“ Stellen der beiden Listen stehenden Wörter können unterschiedlich lang sein. Dann wird im Postschen Korrespondenzproblem die Frage gestellt, ob es eine Indexfolge gibt, so daß die Aneinanderreihung (Konkatenation) der Wörter der ersten Liste gleich der der zweiten Liste ist.

Lösung zu erhalten? Man überlegt sich, daß die Antwort „im Prinzip ja, aber ...“ lautet. Der mit dem „aber“ zum Ausdruck kommende Vorbehalt besteht „technisch gesehen“ darin, daß die vorgestellte beschränkte Version des Postschen Korrespondenzproblems \mathcal{NP} -vollständig⁴ ist.

M.E. kann die Einführung quantitativer Aspekte über Aufwandsabschätzungen von Algorithmen nicht hoch genug veranschlagt werden. Und dies unabhängig davon, was wir von der „unsicheren“ Grenze zwischen \mathcal{P} und \mathcal{NP} halten mögen.

Jedenfalls erlaubt z.B. die Zeitkomplexität eine rationale Aussage über die Güte von Algorithmen zu machen. Damit kommen weitere „Grenzen“ ins Spiel: Gelingt es, untere Komplexitäts-Schranken für ein Problem nachzuweisen, und hat man Algorithmen, die mit diesem Aufwand auskommen, kann man sich eigentlich weitere Bemühungen sparen. „Eigentlich“ sage ich, weil es da noch einiges zu beachten gibt:

- Üblicherweise hat man nur „worst case“-Ergebnisse, ist aber eher am durchschnittlichen Verhalten interessiert.
- Möglicherweise hat man nur Instanzen des Problems zu betrachten, die spezielle Eigenschaften haben, wofür vielleicht doch noch Verbesserungen erzielbar sind.
- Oft ist nicht nur eine Ressource beschränkt, so daß Aussagen über Produktkomplexitäten realistischer wären.
- ...

Ein positives Resümee können wir aber ziehen:

Das Wissen um und die Kenntnis von Komplexitätsgrenzen macht die Nutzung der Computer effizienter.

„Möglichkeiten und Grenzen“ von Methoden und daraus folgend auch der durch sie geprägten Gebiete zu untersuchen, gehört m. E. zum Grundlegenden in der Wissenschaft, zumindest der Natur- und Ingenieurwissenschaften.

Und generell gehört es zur Allgemeinbildung, mit Grenzen vertraut zu sein, z.B. der Lichtgeschwindigkeit und der Heisenbergsche Unschärferelation oder der Gödelschen Unvollständigkeitssätze.

Stößt man in Verfolgung einer Technik an (zumindest derzeit) unüberwindliche Grenzen, wird man einen anderen Weg ausprobieren. Ein möglicher, mir sehr sympathischer, ist der des Parallelismus, wenn es darum geht, Geschwindigkeitsgewinne zu erreichen. Daß meiner Überzeugung nach bei Parallelverarbeitung die Modellierung realer Systeme „natürlicher“ ist und daß Redundanz leichter zu organisieren ist, sei dabei einmal außer Betracht gelassen.

Wenn sich bisher – abgesehen von Gebieten, in denen finanzielle Gesichtspunkte eine eher untergeordnete Rolle spielen, Parallelrechner nicht durchgesetzt haben, liegt dies m. E.

⁴ Dies sind – etwas ungenau gesagt – Probleme, die von *nicht*deterministischen Turingmaschinen in polynomialer Zeit gelöst werden können, während Probleme in \mathcal{P} von deterministischen Turingmaschinen in polynomialer Zeit lösbar sind.

an der so überraschend lang erfolgreichen Entwicklung immer schnellerer sequentieller Rechner. Falls aber in absehbarer Zeit keine auf neuartigen Prinzipien beruhende Rechner, wie z.B. Quanten- oder DNA-Computer, verfügbar werden, werden Parallelrechner zumindest als Zusatzgeräte größere Verbreitung finden, vor allem dann, wenn geeignete Mittel zu ihrer effizienten Programmierung geschaffen werden.

Ich gehe auf dieses Gebiet ein, weil an ihm demonstriert werden kann, daß Grenzziehungen unter unterschiedlichen Aspekten erfolgen können und daß dabei auch deutlich unterschiedliche Ergebnisse die Folge sind.

Drei Sichtweisen sollen gestreift werden:

1. die technisch-algorithmische
2. die abstrakt-modellhafte und
3. die physikalische

und anschließend soll kurz erläutert werden wie physikalische Grenzen auf die Modellbildung rückwirken.

„Technisch-algorithmisch“ soll auf Untersuchungen verweisen, die im wesentlichen zum Ziel haben, für bestimmte Typen von Parallelrechnern – wobei Anzahl von Prozessoren und z.B. Speichergröße variabel gehalten werden – für gewisse Problemklassen – deren Abgrenzung ist selbstverständlich ebenfalls Forschungsgegenstand – „gute“ parallele Algorithmen zu entwickeln und diese effizient zu implementieren. In erster Näherung wird man solche Algorithmen dann als „gelingen“ betrachten, wenn die Ausführungszeiten umgekehrt proportional zur Ressourcengröße, also normalerweise der Anzahl der Einzelprozessoren, sind. Die Grenzen des durch Parallelismus Erreichbaren lassen sich nicht so einfach beschreiben, es sei deshalb nur angemerkt, daß trotz sog. Amdahlschem Gesetz sogar superlineare Beschleunigungen erzielbar sind, was ganz grob gesprochen mit Möglichkeiten beim Einsparen von Wegverfolgungen zu tun hat.

Der Eigenart von Parallelrechnern entsprechend – es gibt nicht den Parallelrechner, sondern eine Vielzahl von Konstruktionen, nicht nur technisch gesprochen, sondern von der Grundkonzeption her – gibt es auch eine Vielzahl abstrakter Modelle. Hier kann nicht näher darauf eingegangen werden (s. z.B. Vollmar et al. [26]). Erwähnt sei nur, daß mit dem Modell der parallelen Registermaschine Probleme aus \mathcal{P} in logarithmischer Zeit gelöst werden können.

Dies beruht im wesentlichen darauf, daß mit fortschreitender Zeit eine exponentiell wachsende Anzahl von Prozessoren aktiviert werden kann.

Auch wenn man Zweifel an der Realitätsnähe eines solchen Modells haben kann – und daß sie berechtigt sind, ersieht man aus den Ausführungen im nächsten Absatz –, so ist die Frage nach den auf jeden Fall vorzunehmenden Änderungen nicht einfach zu beantworten: Wie schon eingangs bemerkt, sollten „technische Zufälligkeiten“ bei diesen Modellierungen keine wesentliche Rolle spielen, gerade weil Entwicklungen in diesem Bereich gleichsam über Nacht die gesamte Landschaft ändern können: Wäre Kommunikation einfach z.B. mittels Licht (ohne physische feste Verbindungen) zu realisieren, wäre für einen Parallelrechner sicherlich der vollständige Graph das Kommunikationsnetzwerk der Wahl.

Hat man „klassische Rechner“ im Auge, d.h. sieht man einmal von den noch offenen Möglichkeiten von Quantencomputern ab (s. z.B. Gruska [9]), wird man sich wohl, Schorr [22] folgend, auf zwei Grundannahmen verständigen können:

1. Jedes Prozessorelement nimmt ein endliches Volumen >0 ein.
2. Informationsübertragung ist durch die Lichtgeschwindigkeit beschränkt.

Dann läßt sich beweisen, daß jeder auf diesen Annahmen basierende Parallelrechner in Polynomialzeit von einem sequentiellen Computer simuliert werden kann.

Damit haben wir eine weitere Grenzlinie aufgezeigt, nämlich die, die durch den Einsatz noch so vieler Prozessoren nicht überschritten werden kann.

Wenn dies auch ernüchternd klingen mag, hat es doch den Vorteil, unserer Intuition entgegenzukommen. Und außerdem darf nicht übersehen werden bzw. gering geachtet werden, daß z.B. eine für einen sequentiellen Rechner durch ein Polynom gegebene Zeitschranke durch Parallelverarbeitung um „mehrere Grade“ gesenkt werden kann und damit Probleme von der „faktischen Unlösbarkeit“ in den „handhabbaren Bereich“ transformiert werden können. In diesem Zusammenhang sei auch darauf verwiesen, daß bei manchen Problemen bessere Algorithmen spektakuläre Beschleunigungen nach sich ziehen. Oosterlee et al. [20] geben ein Beispiel, bei dem auf diesem Wege ein Faktor > 400 erhalten wurde, und merken dazu an, daß die „Kombination von Adaptivität und Parallelität [...] eine der Herausforderungen des Wissenschaftlichen Rechnens“ sei.

Kommen wir zurück auf physikalische Grenzen, die für unser Fach relevant sind. Von Bremermann [5] gibt es eine sehr frühe Abschätzung – über quantenphysikalische Argumentation – über die maximal erreichbare Rechengeschwindigkeit. Sie liegt so hoch, daß wir uns während unserer Lebenszeit sicherlich nicht damit zu befassen brauchen. Anders ist es um eine weitere physikalische Größe bestellt: die beim Rechnen erzeugte Wärme. Das Problem der Wärmeabgabe stößt mit dem Aufkommen tragbarer Computer wieder verstärkt auf das Interesse der Forschung, auch wegen der Frage des Energieverbrauchs.

Von irreversiblen Berechnungen, also solchen, bei denen aus dem Ergebnis nicht auf die Eingabe rückgeschlossen werden kann, weiß man, daß sie zwangsläufig Energie verbrauchen und damit Wärme erzeugen müssen. Dies ist anders bei reversiblen Vorgehen, das im Prinzip ohne Energieverbrauch auskommt. Da man weiß, daß man alle Berechnungen so „erweitern“ kann, daß sie reversibel werden, so gibt es z.B. universelle reversible Turingmaschinen, sollte das Problem gelöst sein – ist es aber nicht, weil zumindest derzeit dem unbegrenzten reversiblen Vorgehen technische Schwierigkeiten entgegenstehen.

Im Zusammenhang mit Überlegungen zur dreidimensionalen Packung aktiver Prozessorelemente spielt die Wärmeabgabe eine besondere Rolle, hat man doch – bei einem naiven Ansatz – nur die Oberflächen zur Abstrahlung. Es läßt sich in der Tat zeigen, daß z.B. für das Modell des dreidimensionalen Zellularautomaten Probleme existieren, die wegen der begrenzten Wärmeabgabemöglichkeiten nicht mit der prinzipiell möglichen Geschwindigkeit behandelt werden können (Sanders et al. [21]).

Abschließen will ich diesen Abschnitt über Beispiele informatikimmanenter Grenzen mit einem Zitat von Gruska [8]:

„The search for borderlines between the possible and the impossible is one of the main aims [...] of science. The discovery of such limitations and borderlines is often the beginning of a long chain of very fruitful contributions to science.“

Wenn auch – wie bereits an einigen Stellen angedeutet – der Grenzverlauf noch nicht überall bekannt ist, so ist vielleicht doch der Hinweis angebracht, daß diese Grenzen „hart“ sind, in dem Sinne, daß unter den jeweils festgelegten Voraussetzungen entsprechende Aussagen bewiesen sind.

Andersartige Grenzen, die für die Informatik von Bedeutung sind, entweder weil sie sie strikt einhalten sollte – Stichwort „ethische Grenzen“ – oder gerade zu ihrer Überwindung beitragen sollte – Stichwort „Menschen mit speziellen Bedürfnissen“ – habe ich an anderer Stelle diskutiert [25], so daß ich mich hier mit dieser Erwähnung begnügen will.

Grenzen zwischen der Informatik und anderen Wissenschaften

Um nochmals anders aufzufassende „Grenzen“ handelt es sich beim Verhältnis der Informatik zu anderen Wissenschaften.

Lassen Sie mich wieder mit einem Zitat beginnen (Mönch [18]):

„... Nach unserem (i.e. kontinentaleuropäischen -d. A.) Empfinden ist eine Grenze etwas Festes, Geschlossenes – zeitweise vielleicht umkämpft, aber doch im wesentlichen unverrückbar [...]. Für den Angelsachsen ist frontier das Gegenteil, nämlich etwas Offenes [...]. Die ‘Grenze’ [...] wurde zum Inbegriff alles Lockenden und Lohnenden, zum Ort, wo den Tapferen und Tüchtigen zwar Gefahr, aber auch reicher Gewinn erwartet, solange sie nur ‘offen’ ist; eine ‘geschlossene’ Grenze bedeutet das Ende der Hoffnung, den Zwang zur Resignation. [...]“

Ich denke, es findet breite Zustimmung, wenn ich dafür plädiere, Grenzen zwischen den Wissenschaften, bzw. speziell zwischen der Informatik und anderen Wissenschaften in diesem Sinne der frontiers zu verstehen.

Ich will das Thema nicht sehr vertiefen, sondern nur einige Zitate zum Verständnis der Informatik anführen.

F.L. Bauer sieht die Informatik als Ingenieurwissenschaft, allerdings in besonderer Nähe zur Mathematik [3]:

„Innerhalb der gesamten Geisteswissenschaft ist eben die Mathematik die einzige exakt zu nennende Spielart; sie steht deshalb von den Ingenieurwissenschaften der Informatik am nächsten, der einzigen, die sich mit immateriellem, mit ‘physikfreiem’ ingenium befaßt. Das verbindet Mathematik und Informatik, macht sie zu Geschwistern.“

Zemanek sagt dazu [28]:

„Die Nähe zu Gehirn und Geist macht die Informationstechnik zu einer Brücke zwischen Natur- und Geisteswissenschaften und gibt ihr selbst geisteswissenschaftliche Züge, mehr noch: Geisteswissenschaftliche Natur; sie ist mehr als Technik, so wie sie mehr als Mathematik ist, auch wenn Technik und Mathematik ihr Anfang waren und ihr Bild gestalteten.“

Und bereits 1981 schrieb Ganzhorn [7]:

„Mit der ‘Information’ als Element technischer Einrichtungen hat sich unversehens ein neuer [...] Bereich aufgetan, der typisch interdisziplinär seinen Platz zwischen Mathema-

tik, Logik, Ingenieurwissenschaften und Linguistik finden mag. Nachdem jedoch auch biologische Prozesse wesentlich informativ bestimmt sind, wird jeder Versuch einer Abgrenzung zum sachlich schwer vertretbaren Dogma [...]“.

Unabhängig davon, welchen Aspekt der Informatik man betonen möchte, ob man sie als Strukturwissenschaft, als eine Werkzeugwissenschaft des Geistes, als Schlüssel- oder als Querschnittsdisziplin sieht (Näheres dazu findet sich bei Coy [6].), vermeiden sollte man den Versuch, der Abgrenzung gegenüber anderen Gebieten, sondern sich bemühen, die positiven Seiten der Verwandtschaft zu sehen und zu nutzen.

Gerade aber interdisziplinäres Arbeiten gedeiht nur in einem geeigneten Biotop.

Zunächst wieder ein Zitat (von Kohler [15]):

„Oder hat Karl Schmid recht, wenn er 1973 [...] mit Nachdruck die ‘Spontaneität des Forschens’, das ‘Originale, das ‘Unkonforme’, Querköpfige allen ‘Wissenwollens’ unterstreicht und damit die ‘autonome Freiheit des Forschers’ gegen jegliche Planungsziele verteidigt?“

Sie werden sich nach dem Bisherigen nicht wundern, daß dies für mich eine rein rhetorische Frage darstellt. M. E. wird man statt von Forschung eher von einer Entwicklungstätigkeit sprechen müssen, wenn am Beginn einer Arbeit die Ergebnisse bereits zu erkennen sind. Und dies soll durchaus nicht negativ verstanden werden, allein schon deshalb, weil wohl auch der Hauptteil der „reinen“ Forschung aus der Verfolgung sichtbarer Wege besteht – und ich habe im Vorstehenden des öfteren auf solche Notwendigkeiten hingewiesen, und ich möchte ausdrücklich betonen, daß ich dies keineswegs als zweitklassig oder auch nur als einfacher ansehe. Wollen wir aber das uns oft vorgeworfene nur marginale Verbessern überwinden und genuin neue Methoden und Produkte entwickeln, so müssen auch Richtungen eingeschlagen werden, die ein Scheitern wahrscheinlicher machen als einen Erfolg. (Auf die dabei zu überwindenden gesellschaftlichen Hürden kann ich aus Raumgründen nicht eingehen.) Um Ihnen wenigstens einen Anhaltspunkt zu geben, wofür ich plädiere, will ich lediglich die Stichwörter Quanten-Computing und DNA-Computing erwähnen, aber auch darauf verweisen, daß ich im biologischen, insbesondere im physiologischen Bereich Ansätze sehe.

U. U. könnten dabei auch Teillösungen für die doch sehr verbesserungsbedürftige Interaktion zwischen Mensch und Computer gefunden werden.

Um es nochmals deutlich zu betonen: Forschung, die auf Anwendungen zielt oder auch diese nur im Auge hat, braucht keineswegs einen minderen Rang als „reine“ Forschung zu haben, letztere hat meiner Auffassung nach aber nicht nur eine Existenzberechtigung im Rahmen der akademischen Freiheit, sondern ist unabdingbar für unser Verständnis der Welt und zur Erreichung u.a. der oben erwähnten Ziele.

Und da Wissenschaft von Generation zu Generation weitergegeben werden muß, braucht es vor allem begeisterte Menschen.

„Gute Lehrer und Lehrerinnen, die – auf allen Stufen und erst recht auf der universitären Ebene – dem vernünftigen Wissen und Wissen-Wollen auf die Sprünge helfen, sind nie bloss Kenntnisüberbringer, Funktionäre des Informationstransfers. Sie sind Hellmacher, Heimzünder, ‘Aufwecker der Seele aus dem tiefen Schlaf der Gewohnheit’, wie Ralph Waldo Emerson sagt. Um dazu aber imstande zu sein, braucht das Lehren die Spielräume

der Individualität, die Rechte, die für die Stufe der Universität seit dem 19. Jahrhundert im Prinzip der 'akademischen Freiheit' konzentriert sind, und nach wie vor gegen dogmatische Ansprüche, von welcher Seite sie auch erhoben werden mögen, eingeklagt und verteidigt werden müssen.“ (Kohler [15])

Literatur

- [1] ANTONIOU, I., REEVE, M. & STENNING, V.: The information society as a complex system, J.UCS, 6, 2000, 272-288
- [2] AZVINE, B., AZARMI, N. & NAUCK D.D.: Intelligent Systems and Soft Computing, Springer, Berlin, 2000, p. XI
- [3] BAUER, F.L: Informatik und Algebra, in: Broy, M. (Hrsg.), Informatik und Mathematik, Springer, Berlin, 1991, 28-40
- [4] BODENHEIMER, A.R.: Verstehen heißt antworten, Reclam, Stuttgart, 1992
- [5] BREMERMAN, H.J.: Limitations on data processing arising from quantum theory zitiert nach: Bremermann, H.J.: Complexity of automata, brains, and behavior, in: Conrad, M., Güttinger, W., Dal Cin, M. (Eds.), Physics and Mathematics of the Nervous System, Springer, Berlin, 1974, 304-331
- [6] COY, W.: Defining discipline, in: Freksa, C., Jantzen, M., Valk R. (Eds.), Foundations of Computer Science, Springer, Berlin, 1997, 21-35
- [7] GANZHORN, K.E., SCHULZ, K.M. & WALTER, W.: Datenverarbeitungssysteme, Springer, Berlin, 1981
- [8] GRUSKA, J.: Foundations of Computing, Thomson, London, 1997
- [9] GRUSKA, J.: Quantum Computing, McGraw-Hill, London, 1999 .
- [10] GRUSKA, J. & VOLLMAR, R.: Towards adjusting informatics education to information, in: Freksa, C., Jantzen, M., Valk, R. (Eds.), Foundations of Computer Science, Springer, Berlin, 1997, 49-67
- [11] HARTMANIS, J.: Turing Award Lecture: On computational complexity and the nature of Computer Science, ACM Computing Surveys 27, 1995, 7-16
- [12] HARTMANIS, J. & LIN, H. (Eds.): Computing the Future, National Academy Press, Washington, D.C., 1992
- [13] HELDIGE, H.D.: Weltbibliothek, Universalenzyklopädie, Worldbrain: Zur Säkulardebatte über die Organisation des Weltwissens, Technikgeschichte 67, 2000, 303-329
- [14] KLUGE, F.: Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache, 18. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1960
- [15] KOHLER, G.I: Über die Weisheit der Igel und die Einsichten der Hasen, Neue Zürcher Zeitung, 10.4. 2000, 23

- [16] MITTELSTRASS, J.: Das Udenkbare denken, UVK Universitätsverlag, Konstanz, 1998
- [17] MITTELSTRASS, J.: Der Bibliothekar als Partner der Wissenschaft, Manuskript eines in Leipzig im März 2000 gehaltenen Vortrages
- [18] MÖNCH, K.: In: Clarke, A.C., Anmerkung des Übersetzers, Im höchsten Grade phantastisch, Fischer, Frankfurt/M., 1969, 93
- [19] NATKE, H.G.: Systemtechnik und Gewässergüte: Operationalisierung, Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, XLIX (1999), 81-98
- [20] OOSTERLEE, K., SCHÜLLER A. & TROTTEBERG, U.: Durchbruch im Wissenschaftlichen Rechnen durch adaptive Mehrgitterverfahren auf Parallelrechnern, Der GMD-Spiegel 3, 1997, 15 -18
- [21] SANDERS, P., VOLLMAR, R. & WORSCH, T.: Feasible models of computation: Three-dimensionality and energy consumption, in: Lengauer, C., Griebel, M., Gortlatch, S. (Eds.), Euro-Par '97, Springer, Berlin, 1997, 384-388
- [22] SCHORR, A.R.: Physical parallel devices are not much faster than sequential ones, Information Processing Letters, 17, 1983, 103-106
- [23] TURING, A.M.: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, Proc. London Math. Soc. 42, 1937, 230-265; Korrektur ebenda 43, 544-546
- [24] TOULMIN, S.: Voraussicht und Verstehen, Suhrkamp, Frankfurt/M., 1981
- [25] VOLLMAR, R.: Grenzüberschreitende Informatik? Techn. Bericht 1999-16, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1999
- [26] VOLLMAR, R. & WORSCH, T.: Modelle der Parallelverarbeitung, Teubner, Stuttgart, 1995
- [27] VON DER MALSBURG, C.: Rechnen ohne Algorithmus, Vortrag im Rahmen des Workshops „Neue Konzepte der Informationsverarbeitung nach biologischen Prinzipien“, Berlin, 16.3.2001
- [28] ZEMANEK, H.: Das geistige Umfeld der Informationstechnik, Springer, Berlin, 1992